

董姝含, 吕慧捷, 周锋, 张效琛, 何红波, 张旭东, 张威. 2022. 玉米土壤有机氮组分的生长季动态变化及其对当季和长期秸秆还田的响应. 生态学杂志, 41(1): 73-80.

Dong SH, Lyu HJ, Zhou F, Zhang XC, He HB, Zhang XD, Zhang W. 2022. Variation of soil organic nitrogen fractions in maize field during growing season and its response to current year and long-term straw returning. *Chinese Journal of Ecology*, 41(1): 73-80.

## 玉米土壤有机氮组分的生长季动态变化及其对当季和长期秸秆还田的响应

董姝含<sup>1,2</sup> 吕慧捷<sup>3,4</sup> 周锋<sup>1,2</sup> 张效琛<sup>1,2</sup> 何红波<sup>1</sup> 张旭东<sup>1</sup> 张威<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>新疆巴音郭楞职业技术学院, 新疆库尔勒 841000; <sup>4</sup>浙江大学宁波理工学院, 浙江宁波 315100)

**摘要** 阐明土壤有机氮组分的生长季变化特征及其对当季和长期秸秆还田的响应有助于合理调控土壤有机氮库, 提高土壤肥力。本试验依托辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站进行田间微区试验, 设置单施氮肥和秸秆还田配施氮肥两个处理, 分别在播种前、拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期采集土样, 采用Bremner法对土壤有机氮组分进行分级。结果表明: 在玉米生长季中, 土壤各形态有机氮组分呈现明显的动态变化规律。酸解氨态氮含量呈先升高后降低趋势, 表明其在土壤氮素转化过程中可能充当临时库的作用; 氨基酸态氮在整个生长季内变化不显著; 氨基糖态氮在作物生育后期显著低于生育前期; 酸解未知态氮在整个生育期内先升高后降低, 活性较高; 与单施氮肥处理相比, 秸秆还田在生长季末期和长期均提高土壤总氮和各酸解态氮组分的含量, 并使土壤酸解态氮占土壤总氮比例升高, 使未酸解态氮占土壤总氮的比例降低, 在当季和长期分别降低了7.2%和3.8%, 说明秸秆还田既能提高土壤氮素的有效性, 又能够提高土壤的保氮供氮能力。

**关键词** 土壤有机氮组分; 秸秆还田; 季节动态; 玉米; 施肥

**Variation of soil organic nitrogen fractions in maize field during growing season and its response to current year and long-term straw returning.** DONG Shu-han<sup>1,2</sup>, LYU Hui-jie<sup>3,4</sup>, ZHOU Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-chen<sup>1,2</sup>, HE Hong-bo<sup>1</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; <sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; <sup>3</sup>*Bayinguoleng Vocational and Technical College, Korla 841000, Xinjiang, China*; <sup>4</sup>*Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China*).

**Abstract:** The analysis of the variation of soil organic nitrogen fractions in growing season and its response to current year and long-term straw returning could provide scientific basis for reasonable regulation of soil organic nitrogen pool and the improvement of soil fertility. A field plot experiment with two treatments was conducted at the National Field Observation and Research Station of Shenyang Agroecosystems, i.e., single application of nitrogen fertilizer and straw returning combined with nitrogen fertilizer. Soil samples were collected at before-seeding, jointing, silking, filling, and maturity stages. Bremner method was used to classify soil organic nitrogen fractions. The results showed that each of the organic nitrogen fractions in the soil showed obvious dynamic patterns in the whole growing season of maize. Hydrolyzable ammonium content increased firstly and then decreased, indicating that it may act as a temporary pool during soil nitrogen transformation. Amino acid nitrogen did not vary significantly across the growing season. Amino sugar nitrogen was significantly lower in the late growing season than that in the early growing season. Hydrolyzable unknown nitrogen increased and then decreased with high activity across the growing season. Compared with single nitrogen treatment, straw returning increased the contents of soil total nitrogen and hydrolyzed nitrogen at the end of the growing season and in the long term, increased the proportion of hydrolyzed nitrogen to

国家重点研发计划(2017YFD0200100)、国家自然科学基金面上项目(41877040和42177324)、国家自然科学基金重点项目(41630862)、辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200025)、新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A05)、天山青年计划-基层青年科技人才项目(2020Q142)和巴音郭楞蒙古自治州科学研究项目(202003)资助。

收稿日期: 2021-03-30 接受日期: 2021-09-29

\* 通讯作者 E-mail: zhangw@iae.ac.cn

total nitrogen, and decreased the proportion of no hydrolyzed nitrogen to total nitrogen by 7.2% and 3.8% in the current season and long term, respectively. The results indicated that straw returning could not only improve soil nitrogen availability, but also improve the capability of soil nitrogen storage and supply.

**Key words:** soil organic nitrogen fraction; straw returning; seasonal dynamics; maize; fertilizer application.

氮是植物的必需营养元素之一,也是限制作物产量的主要因子之一。土壤氮素主要以有机氮形态存在,占土壤全氮含量的90%以上(Stevenson, 1982)。土壤有机氮在维持土壤氮素肥力方面具有重要意义,是植物所需矿质氮的源和库。土壤有机氮库的容量和周转直接决定土壤的保氮和供氮能力,是土壤-植物系统氮素循环的核心控制因素(Stevenson, 1982; Schulten *et al.*, 1998)。土壤有机氮库并不是一个自然整体,而是含有多种不同来源和性质的组分。根据经典的Bremner土壤有机氮组分(形态)分类方法,土壤有机氮包含酸解氨态氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸性未知氮和未酸解态氮等形态(Bremner, 1965; Stevenson, 1982)。不同形态有机氮组分在土壤氮循环过程中的贡献不同(吴汉卿等, 2018),深入理解土壤有机氮各组分的变化,对土壤培肥与合理施肥均具有重要意义。

肥料氮素是农田系统中主要的氮素来源之一,在增加作物产量上发挥着重要作用(Bol *et al.*, 2008)。有研究认为,施氮显著提高了酸解氨态氮的含量,但降低了氨基糖态氮的含量,氨基酸态氮和酸解未知态氮的含量增加不显著(李世清等, 2004; He *et al.*, 2006);也有研究认为,氮添加能够降低土壤氨基酸态氮含量,增加氨基糖态氮含量(Tian *et al.*, 2017)。Durani等(2016)认为,施肥改变了土壤酸解氮各组分的含量和分配比例,其中氨基酸态氮含量和分配比例的提升效果最为明显。可见,土壤中不同的有机氮组分对施肥的响应并不一致,可能受土壤类型和肥料种类等影响(焦亚鹏等, 2020)。作物秸秆是农田土壤有机质的重要来源之一(王学敏等, 2020)。合理的耕作方式和秸秆还田可增加土壤有机质和养分含量(何新颖等, 2019; 马琨等, 2019)。研究表明,秸秆还田能够提高长期连作棉田耕层土壤全氮和有机氮各组分含量,增强土壤的供氮能力,提高土壤肥力,增加不易分解的酸解未知氮和未酸解态氮含量,维持土壤氮库的稳定性(马芳霞等, 2018)。也有研究发现,在施用化肥的基础上配施秸秆,可显著增加酸解性氮的含量及比例,而对未酸解性氮的影响则相反(李世清等, 2004)。然而,以往的研究主要围绕长期施肥及秸秆还田对土

壤有机氮库组分的影响,对于作物生长季内(短期)土壤有机氮库组分的动态变化研究较少,同时将秸秆还田对土壤有机氮组分的短期和长期影响相结合,可以更深入地了解土壤有机氮组分的动态变化。本文通过田间微区试验,研究了单施氮肥以及氮肥配施玉米(*Zea mays* L.)秸秆处理对于玉米生长季内和12年后成熟期土壤有机氮组分动态变化的影响,为合理施肥提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验区概况

本试验研究地点位于中国科学院沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站(41°32'N, 122°23'E),该站是中国生态系统研究网络台站之一,建于1987年,位于辽宁省沈阳市苏家屯区十里河镇,地处下辽河平原,属暖温带湿润一半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季。年平均气温7~8℃,最高月(7月)平均气温24℃,最低月(1月)平均气温-13℃,年均降水量为650~700 mm,年总辐射量为504~567 kJ·cm<sup>-2</sup>,土壤类型为潮棕壤。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,小区(1.6 m×1.3 m)用PVC板围成,PVC板插入地下35 cm并高出地上15 cm,小区之间相距2.5 m。本试验设置单施氮肥(N)和玉米秸秆还田配施氮肥(N+S)2个处理,每个处理设置3个重复。每个小区内种植12棵玉米。一季玉米的施氮量为200 kg·hm<sup>-2</sup>,施磷量为30 kg·hm<sup>-2</sup>,施钾量为58 kg·hm<sup>-2</sup>,均为当地施用量。所用氮肥为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,磷肥为KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,钾肥为K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。磷肥和钾肥作为底肥一次性施入,氮肥底肥施入量为50 kg·hm<sup>-2</sup>,底肥采用条施的方式,第一次追氮肥(拔节期)100 kg·hm<sup>-2</sup>,第二次追氮肥(吐丝期)50 kg·hm<sup>-2</sup>。玉米秸秆(风干)在播种时覆盖还田,覆盖量为5000 kg·hm<sup>-2</sup>,试验开始于2008年。

### 1.3 样品采集与测定

**1.3.1 样品采集** 取样时每个小区用直径5 cm的土钻随机取5点,取好的样品放在塑料桶中混匀作为1个微区的样品。取样时间分别为播种前(2008-

04-29),拔节期(2008-07-04),吐丝期(2008-07-28),灌浆期(2008-08-27),成熟期(2008-09-28和2019-09-29)。取样在各次追肥前进行,采样深度为0~20 cm。样品采回风干后过2 mm筛,并于2009年和2019年进行测定。

**1.3.2 样品测定** 土壤全氮含量:利用元素分析仪测定。土壤氨基酸态氮含量(He *et al.*, 2011):采用6 M盐酸水解,经纯化和衍生后(AQC柱前衍生),利用液相色谱测定。土壤氨基糖态氮含量(Zhang *et al.*, 1996):采用6 M盐酸水解,经纯化和衍生后利用气相色谱测定。酸解氨态氮、未酸解态氮(Bremner, 1965; Lyu *et al.*, 2013):采用6 M盐酸水解,水解液经中和后,利用氧化镁-蒸馏-硫酸标准液滴定法测定酸解氨态氮含量;利用元素分析仪测定水解残渣态氮(未酸解态氮)含量。

#### 1.4 数据分析

氨基酸(糖)态氮总量 =  $\sum$  每种氨基酸(糖)态氮含量测定值

酸解氨态氮含量( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) =  $[c \times (V - V_0) \times M \times ts] / m \times 1000$

式中: $V$ 为样品滴定硫酸标准溶液的体积(mL); $V_0$ 为空白滴定硫酸标准溶液的体积(mL); $c$ 为硫酸标准液的浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $M$ 为氮的摩尔质量; $ts$ 为分取倍数; $m$ 为土壤样品质量(g)。

酸解未知态氮含量 = 土壤总氮含量 - 氨基酸态氮含量 - 氨基糖态氮含量 - 酸解氨态氮含量 - 未酸解态氮含量

酸解总氮 = 氨基酸态氮 + 氨基糖态氮 + 酸解氨态氮 + 酸解未知态氮

所有试验数据采用Microsoft Excel 2019 进行整理分析,使用Origin 2021 进行绘图。采用独立样本 $T$ 检验(Independent-samples  $T$  test)和单因素方差分析(one-way ANOVA) Duncan 检验法进行数据处理与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米生长季土壤全氮的动态变化

由表1可以看出,在一个完整的玉米生长周期

表1 不同处理下土壤总氮的动态变化

Table 1 Dynamic variations of soil total nitrogen under different treatments ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )

处理 Treatment	播种前 Before seeding	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	灌浆期 Filling	成熟期 Harvest
单施氮肥 N	961.7±10.4 a	985.0±18.0 a	1005.0±31.2 a	1003.3±18.9 a	956.7±2.9 a
秸秆+氮肥 N+S	981.6±57.3 A	1034.2±4.5 A	1022.8±1.8 A	1033.6±19.9 A	1003.3±2.3 A

注:同行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters in the same line indicate significant differences at  $P < 0.05$ .

里,无论是单施氮肥处理还是秸秆还田配施氮肥处理土壤全氮含量变化规律相似,均呈先升高后降低的趋势,其中单施氮肥处理最高值出现在吐丝期,秸秆还田配施氮肥处理最高值出现在拔节期。总体来看,两个处理土壤全氮含量随季节动态变化差异均不显著。但在秸秆配施氮肥处理下土壤总氮的含量略高于单施化肥处理,可能秸秆的输入增加了外源氮素向土壤总氮的输入。

### 2.2 玉米生长季土壤酸解态氮的动态变化

**2.2.1 玉米生长季土壤酸解总氮的动态变化** 由图1可知,在玉米生长季中,单施氮肥处理下酸解总氮含量为495.6~578.7  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,秸秆还田配施氮肥处理下为510.2~596.5  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,均占土壤全氮的50%以上,并表现出一定的动态变化规律。单施氮肥处理下,土壤中酸解总氮含量呈先增加后降低的趋势,拔节期最高,成熟期最低。由于播种时底肥的施入,拔节期比播种前酸解总氮含量显著增加了11.7% ( $P < 0.05$ ),拔节期到灌浆期酸解态氮含量有所下降,灌浆期到成熟期显著下降了9.6% ( $P < 0.05$ ),但在播种前和成熟期土壤酸解总氮含量

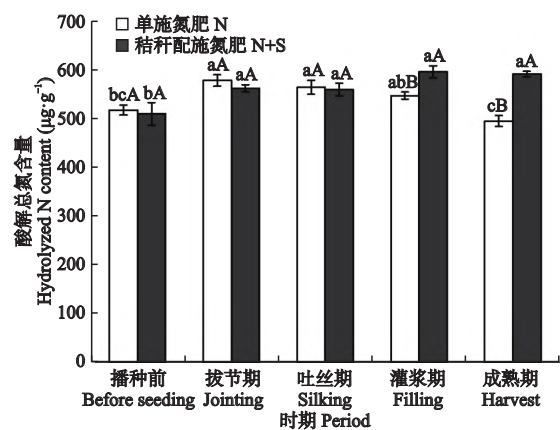


图1 不同处理下土壤酸解总氮含量动态变化

Fig.1 Dynamic variations of hydrolyzed nitrogen in different treatments

注:不同小写字母表示同一处理下不同时期差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同时期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different times under the same treatment at  $P < 0.05$ , and different uppercase letters indicate significant difference between different treatments within the same time at  $P < 0.05$ . The same as below.

差异不显著。秸秆还田配施氮肥处理下,酸解总氮含量呈先升高后趋于稳定的趋势,灌浆期最高,播种前最低;与单施氮肥处理结果相似,秸秆还田配施氮肥处理下拔节期的酸解总氮含量与播种前相比显著增加 10.3% ( $P<0.05$ )。与单施氮肥处理不同的是,秸秆还田配施氮肥处理下酸解总氮含量在成熟期比播种前显著提高了 16% ( $P<0.05$ ),灌浆期到成熟期下降幅度不显著。在播种前、拔节期和吐丝期,酸解总氮含量在两种处理下差异不显著,但在灌浆期和成熟期秸秆还田配施氮肥处理显著增加了酸解总氮的含量 ( $P<0.05$ )。

**2.2.2 玉米生长季土壤酸解态氮各个组分的动态变化** 由图 2 可知,在玉米生长季中,单施氮肥和秸秆配施氮肥处理下,土壤中各形态酸解态氮呈现出一定的动态变化规律。单施氮肥处理下酸解氨态氮含量为  $176.0\sim 216.8\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,在播种前时含量最低,到拔节期时,酸解氨态氮由于播种时底肥的施入而显著增加,而后随时间变化不大,但是到成熟期时其含量显著下降 ( $P<0.05$ )。秸秆配施氮肥处理中酸解氨态氮含量为  $176.3\sim 230.2\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,与单施氮肥处理相同是最高值出现在灌浆期,播种前最低,从播种前到拔节期酸解氨态氮显著提高了 19.4% ( $P<0.05$ ),并且从吐丝期到灌浆期酸解氨态氮的含量也显著增加,灌浆期到成熟期变化不显著。在作物生长的前 3 个时期,两种处理间酸解氨态氮含量

差异不大,而在灌浆期和成熟期秸秆还田显著提高土壤中酸解氨态氮含量 ( $P<0.05$ )。

单施氮肥处理和秸秆还田配施氮肥处理下,氨基酸态氮含量分别为  $176.8\sim 197.0\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $186.2\sim 198.6\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,均在拔节期时含量最高,在灌浆期时含量最低,但在整个生长期内氨基酸态氮含量变化均不显著。在玉米生长季的各个时期秸秆配施氮肥处理氨基酸氮含量均高于单施氮肥处理。

氨基糖态氮是有机氮组分中含量最低的。单施氮肥处理下其含量为  $34.0\sim 49.3\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,拔节期最高,成熟期最低,播种前和拔节期显著高于后面 3 个时期 ( $P<0.05$ )。秸秆配施氮肥处理下,氨基糖态氮含量为  $31.0\sim 48.1\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,播种前最高,拔节期最低。与单施氮肥处理相比,在拔节期秸秆还田处理显著降低土壤氨基糖态氮含量,但在其他时期 2 个处理之间氨基糖态氮含量差异不显著。

在单施氮肥处理下,各个时期酸解未知态氮含量为  $75.7\sim 131.6\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,呈先升高后降低的趋势,吐丝期最高,成熟期最低,拔节期到吐丝期显著增加了 11.5% ( $P<0.05$ ),吐丝期到灌浆期显著下降了 9.3% ( $P<0.05$ ),灌浆期到成熟期显著下降了 36.6% ( $P<0.05$ )。秸秆还田配施氮肥处理下,酸解未知态氮含量为  $99.5\sim 136.0\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,呈先升高后趋于稳定的趋势,灌浆期最高,播种前最低,播种前到拔节期和拔节期到吐丝期分别增加了 23.6% 和 6.6%

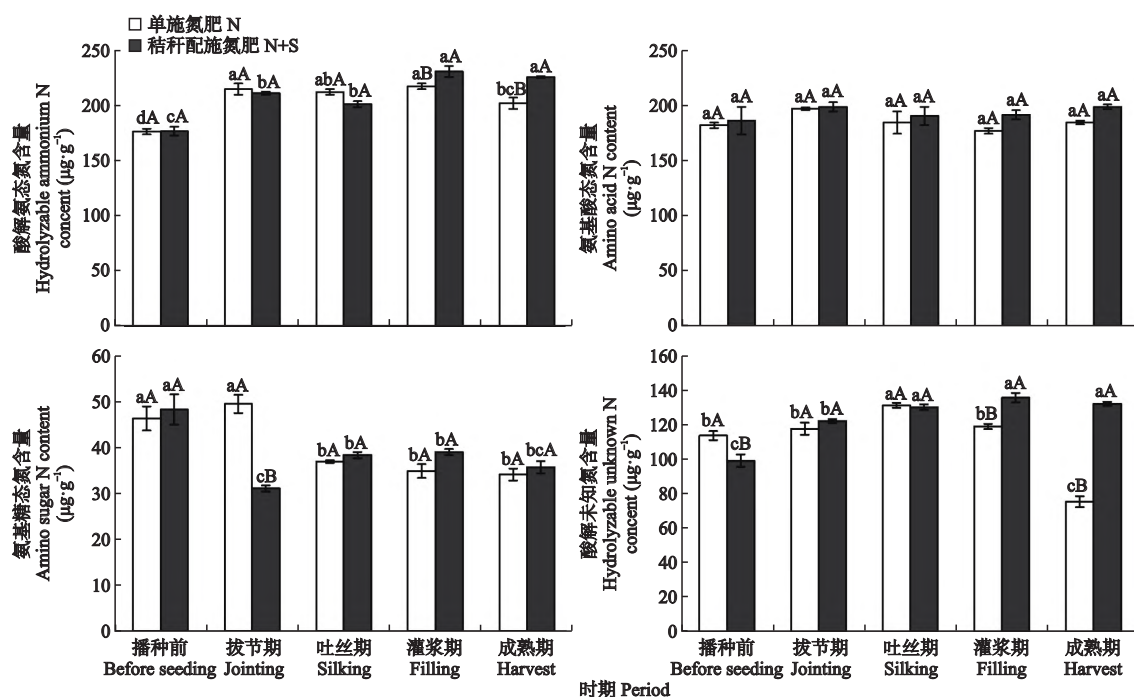


图 2 不同处理下土壤中各酸解态氮含量动态变化

Fig.2 Dynamic variations of different hydrolyzed nitrogen fractions in different treatments

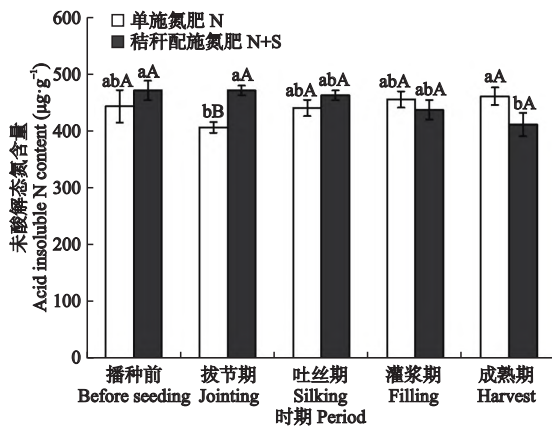


图3 不同处理下土壤中未酸解态氮含量动态变化  
Fig.3 Dynamic variations of acid insoluble organic nitrogen in different treatments

( $P < 0.05$ ), 吐丝期到灌浆期和灌浆期到成熟期变化不大; 与单施氮肥处理相比, 在灌浆期和成熟期秸秆配施氮肥处理显著增加酸解未知态氮含量 ( $P < 0.05$ )。

**2.2.3 玉米生长季土壤未酸解态氮的动态变化** 如图3所示, 单施氮肥处理, 未酸解态氮含量为  $406.3 \sim 461.1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 总体来说随时间变化不大。秸秆还田配施氮肥处理下未酸解态氮含量为  $411.4 \sim 471.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 随作物生长呈现逐渐下降趋势, 并在成熟期其含量显著低于播种前 ( $P < 0.05$ )。

除拔节期秸秆还田配施氮肥处理未酸解态氮含量显著高于单施氮肥处理外 ( $P < 0.05$ ), 其余时期两个处理差异均不显著。

## 2.3 玉米生长季各形态有机氮组分占土壤总氮比例的动态变化

**2.3.1 玉米生长季各酸解态氮占土壤总氮比例的动态变化** 如图4所示, 单施氮肥处理下, 酸解态氮占土壤总氮的比例为  $18.3\% \sim 21.7\%$ , 播种前到拔节期显著提升, 而后趋于稳定。秸秆还田配施氮肥处理下, 酸解态氮占土壤总氮的比例为  $18.0\% \sim 22.4\%$ , 播种前到拔节期、吐丝期到灌浆期显著提升 ( $P < 0.05$ )。总体来看, 从播种前到成熟期, 两种处理下酸解态氮占土壤总氮比例均显著提升。在成熟期, 秸秆配施氮肥处理下酸解态氮占土壤总氮比例显著高于单施氮肥处理 ( $P < 0.05$ )。

单施氮肥处理和秸秆还田配施氮肥处理下, 氨基酸态氮占土壤总氮的比例为  $17.62 \sim 20.0\%$  和  $18.5\% \sim 19.8\%$ , 且各个时期该比例差异均不显著。单施氮肥处理下, 氨基糖态氮占土壤总氮比例为  $3.5\% \sim 5.0\%$ , 并在成熟期该比例显著低于播种前和拔节期。秸秆还田配施氮肥处理下, 氨基糖态氮占土壤总氮的比例为  $3.0\% \sim 4.9\%$ , 经过整个生长季该比例显著下降 ( $P < 0.05$ )。

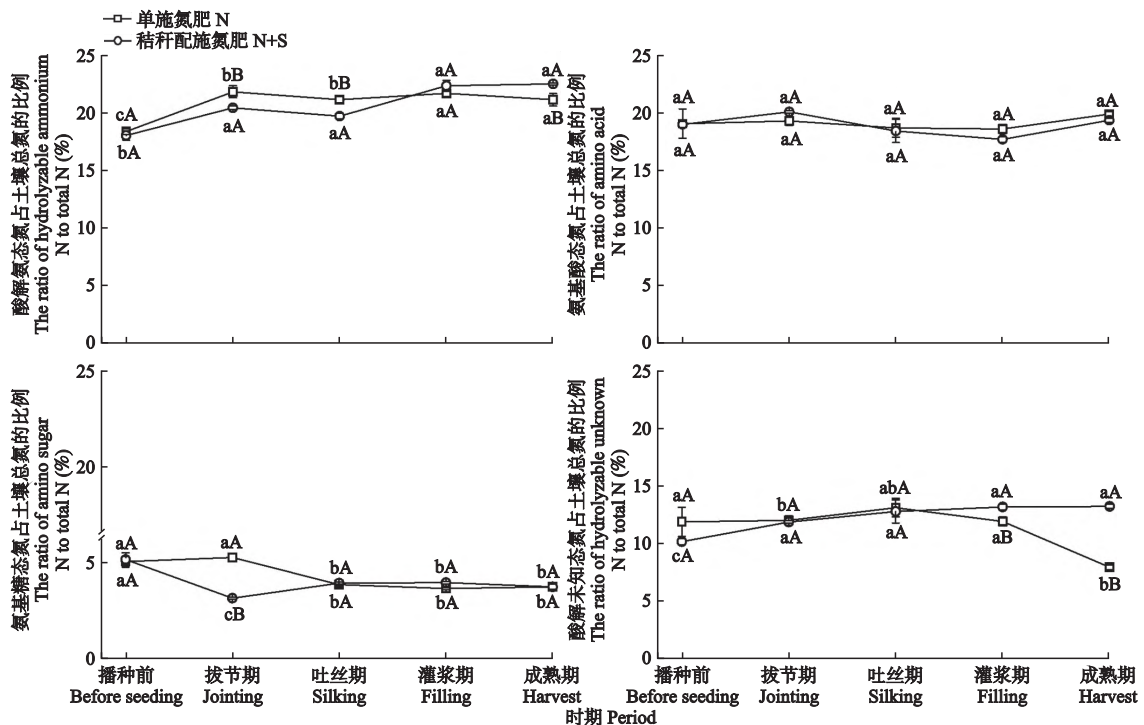


图4 各酸解态氮组分占土壤总氮比例的动态变化  
Fig.4 Dynamic variations of the proportion of hydrolyzed organic nitrogen fractions to total nitrogen

注: 字母字体加粗为单施氮肥处理(N)。下同。

Note: The letters in bold are single application of nitrogen fertilizer (N). The same as below.

单施氮肥处理下,酸解未知态氮占土壤总氮比例为7.9%~13.1%,到成熟期时,显著低于播种前( $P<0.05$ )。秸秆还田配施氮肥处理下,酸解未知态氮占土壤总氮比例为10.1%~13.2%,在玉米生长季内,该比例逐渐升高,到成熟期时,显著高于播种前( $P<0.05$ )。与单施氮肥处理相比,成熟期时秸秆还田配施氮肥处理显著提高酸解未知态氮占土壤总氮的比例( $P<0.05$ )。

**2.3.2 玉米生长季未酸解态氮占土壤总氮比例的动态变化** 如图5所示,单施氮肥处理下,未酸解态氮占土壤总氮比例为41.2%~48.2%,随作物生长呈先下降后升高的趋势,但在成熟期和播种前该比例

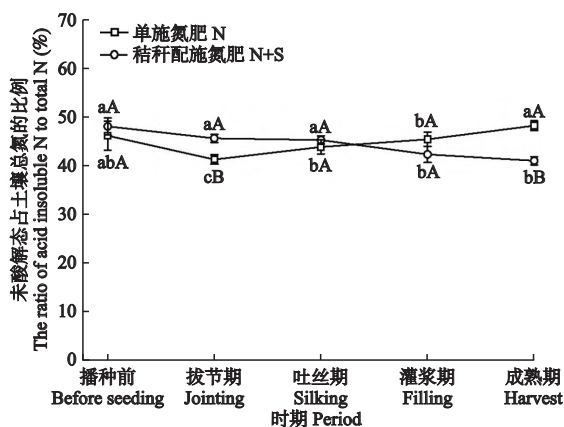


图5 未酸解态氮占土壤总氮比例的动态变化  
Fig.5 Dynamic variations of the proportion of acid insoluble organic nitrogen to total nitrogen

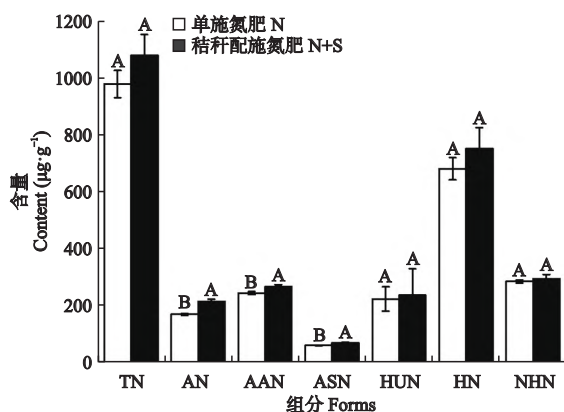


图6 长期秸秆还田对土壤有机氮组分的影响  
Fig.6 Effects of long-term straw returning on soil organic nitrogen fractions

注: TN: 土壤总氮; AN: 酸解氨态氮; AAN: 氨基酸态氮; ASN: 氨基糖态氮; HUN: 酸解未知态氮; HN: 酸解总氮; NHN: 未酸解态氮。下同。同一组分不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: TN: Total N; AN: Hydrolyzable ammonium N; AAN: Amino acid N; ASN: Amino sugar N; HUN: Hydrolyzable unknown N; HN: Hydrolyzed N; NHN: No hydrolyzed N. The same as below. Different letters of the same component indicate significant differences at  $P<0.05$ .

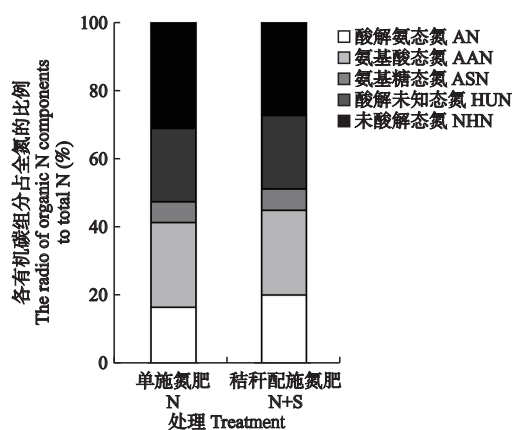


图7 长期秸秆还田对土壤有机氮组分占土壤总氮比例的影响

Fig.7 Effects of long-term straw returning on the ratio of soil organic nitrogen to soil total nitrogen

差异不显著。秸秆还田配施氮肥处理下,未酸解态氮占土壤总氮比例为41.0%~48.0%,在玉米生长季内,该比例呈下降趋势,到成熟期时,显著低于播种前。与单施氮肥处理相比,秸秆还田显著降低了成熟期未酸解态氮占土壤总氮的比例。

**2.4 长期秸秆还田处理对成熟期土壤有机氮组分的影响**

由图6可知,在经过12年的秸秆还田后,与单施氮肥处理相比,成熟期土壤总氮和各有机氮组分的含量增加,并且显著提高酸解氨态氮、氨基酸态氮和氨基糖态氮含量( $P<0.05$ ),分别提高45.4、22.8和9.4  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由图7可知,经过12年的秸秆还田处理后,与单施氮肥处理相比,酸解氨态氮、氨基糖态氮和酸解总氮占土壤总氮的比例提高,对氨基酸态氮和酸解未知态氮影响不大,降低了未酸解态氮占土壤总氮的比例。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤中有机氮组分的动态变化

无论是单施氮肥处理还是秸秆还田配施氮肥处理,土壤有机氮组分的含量表现出了一定的动态变化规律。由于播种时施入了底肥,酸解氨态氮含量及其占土壤总氮的比例显著提升( $P<0.05$ ),这可能一方面,是由于施入的肥料氮素增加了土壤中酸解氨态氮来源的组分;另一方面,施入的肥料氮素改变了土壤微生物数量和活性等(郝晓晖等,2007),改变了有机氮各组分之间的转化,在转化中可能产生酸解氨态氮(王乐云等,2019)。随着作物生长,酸解氨态氮含量有所下降,尤其在单施氮肥处理,说明

在作物生育的初期,肥料氮素快速固存于酸解氨态氮中,随着作物生长发育,酸解氨态氮可以被作物吸收利用,满足作物生长需求(Drury *et al.*, 1991)。此外,在整个生育期内,酸解氨态氮含量净积累,说明施肥可以增加土壤中酸解氨态氮的含量及占土壤总氮的比例。本研究进一步表明,酸解氨态氮在肥料氮素转化过程中可能起到临时库的作用。氨基酸态氮含量及其占土壤总氮的比例在整个生长期内变化不大,说明氨基酸态氮在土壤中相对较稳定,对土壤氮库的保持起到重要作用。Amelung 等(2001)研究表明,酸解氨基酸态氮与土壤微生物代谢活动联系紧密,是土壤固持氮的重要存储库,这与本研究的结果相一致。氨基糖态氮在土壤中含量较低,占土壤总氮含量在3~5%,其含量在作物生育前期(拔节期之前)较高,随着作物的生长其含量降低,并在成熟期时低于播种前,说明在本研究中氨基糖态氮在土壤中转化速率较快。氨基糖态氮是土壤微生物细胞壁残留物,在土壤中有一定的稳定性,其在土壤碳氮的微生物转化过程中具有一定的调控作用,可以作为碳源和氮源,被微生物优先利用,也可以被矿化分解,供植物吸收利用。酸解未知态氮含量在作物生长前期(拔节期和吐丝期)呈升高趋势,原因在于播种时施入了底肥以及在拔节期和吐丝期进行了追肥,使肥料氮素快速形成酸解未知态氮。如果单施氮肥,酸解未知态氮含量随着作物的生长迅速降低,说明酸解未知态氮活性较高,可能对植物的生长起到重要作用。有研究认为,酸解未知态氮是土壤活性氮的主要贡献因子(Kelley *et al.*, 1995; 郝小雨等, 2015),这支持了本研究的结果。单施氮肥处理下,未酸解态氮在作物整个生长周期内其含量变化不大,说明未酸解态氮在土壤中稳定性较高。未酸解态氮占土壤总氮的比例较大,为41%~48%,其可能是土壤氮素的稳定库,在土壤氮素长期供应过程中可能起到重要作用(Lyu *et al.*, 2013)。

### 3.2 秸秆还田对土壤有机氮组分的影响

总体来看,与单施氮肥处理相比,在一个生长季(短期)条件下秸秆配施氮肥处理能够提高土壤总氮及各酸解态氮组分的含量。这是由于有机物料的投入,能够为微生物生长和代谢提供一定的碳源和能源,增强了微生物活性,提高了微生物利用无机氮的能力,增加了土壤有机氮库的库容及各有机氮组分的含量(马芳霞等, 2018; 龙泽华等, 2019)。从动态变化规律来看,秸秆还田对土壤酸解有机氮含量增加(酸解氨态氮和酸解未知态氮)的影响主要在

作物生长后期,即在灌浆期和成熟期,尤其在成熟期,提高幅度更大,说明在经历了一个作物生长季后秸秆还田更有利于土壤酸解有机氮组分在土壤中保持,这有利于为下一季度作物的生长发育提供必要的养分。经过12年秸秆还田处理后,与单施氮肥处理相比,增加了成熟期土壤总氮及各有机氮组分的含量,这与马芳霞等(2018)研究结果相同。同时,秸秆还田对氨基酸态氮和氨基糖态氮的提升比较大,这与短期条件下秸秆还田对氨基酸态氮和氨基糖态氮的积累作用密切相关。总体来看,无论短期还是长期条件下,秸秆还田有利于土壤有机氮组分的积累,进而有利于土壤氮素的保持。

经过一个生长季秸秆还田主要提高成熟期酸解未知态氮、酸解氨态氮占土壤总氮的比例,对氨基糖态氮和氨基酸态氮占土壤总氮的比例影响不大;而经过12年秸秆还田处理后,与单施氮肥相比,提高了成熟期酸解氨态氮和氨基糖态氮占土壤总氮的比例,对氨基酸态氮和酸解未知态氮影响不大;但无论短期还是长期条件下,秸秆还田均提高酸解总氮占土壤总氮的比例,降低未酸解态氮占土壤总氮的比例。王敬等(2016)研究表明,秸秆还田后土壤中腐解形成新的有机质的过程中,土壤腐殖质对酸解氨态氮的固持增加;马芳霞等(2018)研究表明,长期秸秆直接还田增加了氨基糖态氮占全氮比例,降低了未酸解态氮比例;李世清等(2004)研究表明,秸秆直接还田配施化肥降低了未酸解态氮的比例,这均与本研究的结果相一致。

## 4 结 论

在玉米完整的生长季中,土壤各形态有机氮组分呈现出明显的生长季变化规律。酸解氨态氮在肥料氮素转化过程中可能起到临时氮库的作用,氨基酸态氮含量对土壤氮库的保持起到重要作用,氨基糖态氮在整个生长季中转化速率较快,酸解未知态氮活性较高,可能对植物的生长起到重要作用。总体来看,酸解态氮含量随生长季动态变化较大,而未酸解态氮变化不大,说明其在土壤中稳定性较高。与单施氮肥处理相比,无论生长季内还是长期条件下,秸秆还田均能够提高土壤总氮和各酸解态氮组分的含量,并且能够提高酸解总氮占土壤总氮的比例,但降低未酸解态氮占土壤总氮的比例,说明秸秆还田在增加土壤总氮和各酸解态氮组分含量的同时可能会提高土壤氮素的有效性,增强土壤的供氮能力。

## 参考文献

- 郝晓晖, 肖宏宇, 苏以荣, 等. 2007. 长期不同施肥稻田土壤的氮素形态及矿化作用特征. 浙江大学学报(农业与生命科学版), **33**(5): 544-550.
- 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 2015. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征. 中国农业科学, **48**(23): 4707-4716.
- 何新颖. 2019. 吉林省农户玉米秸秆资源化利用生态补偿标准研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 2020. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响. 中国农业科学, **53**(12): 2423-2434.
- 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 2004. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响. 中国农业科学, **37**(6): 859-864.
- 龙泽华, 王晶, 侯振安. 2019. 秸秆炭化还田和施氮量对棉田土壤有机氮组分的影响. 石河子大学学报(自然科学版), **37**(2): 154-161.
- 马芳霞, 王忆芸, 燕鹏, 等. 2018. 秸秆还田对长期连作棉田土壤有机氮组分的影响. 生态环境学报, **27**(8): 1459-1465.
- 马琨, 宋丽丽, 王明国, 等. 2019. 玉米秸秆还田对土壤丛枝菌根真菌群落的影响. 应用生态学报, **30**(8): 2746-2756.
- 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 2016. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响. 土壤学报, **53**(2): 292-304.
- 王乐云, 田飞飞, 能惠, 等. 2019. 不同施肥处理对农田土壤有机氮组分及其矿化的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), **49**(4): 117-127.
- 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 2020. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响. 生态学杂志, **39**(2): 507-516.
- 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 2018. 土壤有机氮组分研究进展. 土壤通报, **49**(5): 1240-1246.
- Amelung W, Zhang XD. 2001. Determination of amino acid enantiomers in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 553-562.
- Bol R, Ostle NJ, Petzke KJ, et al. 2008. Amino acid  $^{15}\text{N}$  in long-term bare fallow soils: Influence of annual N fertilizer and manure applications. *European Journal of Soil Science*, **59**: 617-629.
- Bremner JM. 1965. Organic forms of nitrogen// Black CA, eds. *Methods of Soil Analysis*. Madison, USA: American Society of Agronomy: 1238-1254.
- Drury CF, Voroney RP, Beauchamp EG. 1991. Availability of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  to microorganisms and the soil internal N cycle. *Soil Biology and Biochemistry*, **23**: 165-169.
- Durani A, Brar BS, Dheri GS. 2016. Soil nitrogen fractions in relation to rice-wheat productivity: Effects of long-term application of mineral fertilizers and organic manures. *Journal of Crop Improvement*, **30**: 399-420.
- He HB, Lyu HJ, Zhang W, et al. 2011. A liquid chromatographic/mass spectrometric method to evaluate  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  incorporation into soil amino acids. *Journal of Soils and Sediments*, **11**: 731-740.
- He HB, Xie HT, Zhang XD. 2006. A novel GC/MS technique to assess  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  incorporation into soil amino sugars. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 1083-1091.
- Kelley KR, Stevenson FJ. 1995. Forms and nature of organic N in soil. *Fertilizer Research*, **42**: 1-11.
- Lyu HJ, He HB, Zhao JS, et al. 2013. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. *Plant and Soil*, **373**: 595-607.
- Schulten HR, Schnitzer M. 1998. The chemistry of soil organic nitrogen: A review. *Biology and Fertility of Soils*, **26**: 1-15.
- Stevenson FJ. 1982. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Tian J, Wei K, Condron LM, et al. 2017. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland. *Plant and Soil*, **417**: 217-229.
- Zhang XD, Amelung W. 1996. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1201-1206.

---

作者简介 董姝含,女,1996年生,硕士研究生,主要从事土壤氮素转化过程研究。E-mail: dongshuhan18@mails.ucas.ac.cn  
责任编辑 牟琳

---